

**Р.А. Нейдорф, А.Г. Агаджанян**

**ИССЛЕДОВАНИЕ АСПЕКТОВ ВОЗМОЖНОГО ПРИМЕНЕНИЯ  
СУБОПТИМАЛЬНОЙ ТОНОВОЙ АППРОКСИМАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ  
В ЗАДАЧАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ СРЕДСТВ АВТОНОМНОЙ  
НАВИГАЦИИ**

*В системах т.н. «технического зрения» (СТЗ) для ориентации в пространстве осуществляется распознавание, главным образом, форм предметов. Поэтому в СТЗ используют в основном монохромные изображения. Кроме того, нет необходимости использовать тоновые палитры высокой размерности, т.к. задача сводится к определению границ очевидной смены яркости. В связи с этим, важной задачей обработки пиксельных изображений, получаемых стандартной светочувствительной матрицей системы технического зрения, является перевод их в палитру пониженной размерности. В результате возникает задача аппроксимации сложного изображения его более простым аналогом, т.к. в дальнейшем это значительно упрощает решение задач распознавания образов. В настоящем исследовании рассматривается проблематика оптимальной аппроксимации монохромных мультитоновых изображений, предполагающей понижение размерности палитры. Исследование, главным образом, направлено на вопросы критериев оценки оптимальности аппроксимации, влияния различных детерминированных стратегий определения стартовой аппроксимирующей палитры на поисковую эффективность эволюционно-генетического алгоритма применительно к предметной задаче, потенциальной возможности повышения быстродействия с позиции количественных факторов, а также оптимального размера палитры аппроксимированного изображения, достаточного для решения различных навигационных задач. Исследование позволило в различной степени полностью ответить на все поставленные задачи, а также выбрать наиболее приоритетную и перспективную модель работы алгоритма. Также к основному результату проведенного исследования можно отнести выработку модифицированной многоступенчатой схемы использования эволюционно-генетического алгоритма, что в свою очередь позволит в значительной степени повысить как временные показатели, так и точностные.*

*Аппроксимация изображений; эволюционно-генетический алгоритм; оптимизация палитры; хромосома; техническое зрение; критерий оценки.*

**R.A. Neydorf, A.G. Aghajanyan**

**THE RESEARCH OF THE APPLICATION POSSIBILITIES OF TONES  
APPROXIMATION IN A TECHNICAL VISION FOR THE AUTONOMOUS  
NAVIGATION OBJECTS**

*In the systems of «technical sight» (STS) for orientation used recognition of objects form. That is why in STS generally used monochrome images. Besides there are no need to use huge palette, because the problem is to define obvious changes in brightness. For this reason, the important task of image (which received by STS's photosensitive matrix) processing is converting them to a smaller palette. As a result, there is a problem of image approximation and the solution could simplifies the pattern recognition tasks. The report considers the problem of optimal monochrome multitone image approximation, which consists in reduction the palette size. The research primarily aim to questions of optimal approximation estimation criteria, influence of different deterministic strategies of definition of initial approximation palette on the effectiveness of evolutionarily-genetic algorithm, potential opportunities to increase the speed of the algorithm and optimal palette size of approximated image, which will be enough for solving different navigation tasks. The research allowed to find the answer for all questions and to make a choice of most perspective model of the algorithm. Also one of the important result of the research is the idea of modified multi-step scheme of evolutionarily-genetic algorithm, which will increase the algorithm accuracy and speed.*

*Image approximation; evolutionarily-genetic algorithm; palette optimization; chromosome; technical sight; estimation criteria.*

**Введение.** В задачах устранения последствий чрезвычайных ситуаций, в критических технологиях, военном деле и т.п. все шире используются технические средства автономной навигации (ТСАН) [1–4]. Основным условием их функционирования является возможность длительной работы без участия человека, и возможность самостоятельных перемещений в среде, обусловленной выполняемыми задачами. Максимальная независимость от внешних условий при движении и выполнении технологических операций, обусловленных функционалом конкретного ТСАН, предъявляют к его возможностям ряд специфических требований. Основой автономности является способность оценивать состояние окружающей среды и принимать нужные решения. В связи с этим исследования задач и методов наблюдения и распознавания препятствий движению и конечных его целей чрезвычайно актуальны для создания ТСАН, которые нужны сейчас практически во всех областях человеческой деятельности.

Первой задачей сложного многостадийного процесса идентификации окружающей среды является реализация так называемого технического зрения (ТЗ). Его задача – получение его изображения и его оперативная цифровая обработка, обеспечивающая эффективное извлечения полезной информации из больших массивов данных, характерных для навигационных задач при использовании систем ТЗ [5]. Важно, что эти задачи приходится решать в условиях действия различного рода мешающих факторов – помех, переменчивости условий наблюдения и пр. Исходные данные поступают, как правило, с большой скоростью и требуют обработки в режиме реального времени. Возникает задача компьютерной обработки изображений, а значит соответствующих математических методов их описания и обработки, а также программного обеспечения применительно к конкретным задачам [6–10].

Одной из наиболее сложных и актуальных задач обработки видеоизображения является проблема выделения и распознавания объектов при наличии различного рода помех и создание на этой основе системы мониторинга. Главная задача таких систем – информировать контроллер ТСАН о ситуации, сложившейся в поле зрения камеры, прежде всего, о наличии, размерах, конфигурации и возможных перемещениях препятствий. При этом часто, наряду с другими операциями, возникает задача аппроксимации.

Необходимость в аппроксимации изображений возникает тогда, когда исходное изображение является избыточным по уровню разрешения относительно задачи его использования. Для монохромного варианта параметрами, влияющими на разрешающую способность цифрового изображения, является его размер в пикселях ( $n \times m$ ) в строках и столбцах, а также размерность палитры яркостных тонов, позволяющих передавать различные уровни яркости. Обычно в системах ТЗ пиксельный размер определяется техническими характеристиками аппаратуры и варьированию и корректировке не подлежит. А вот размерность монохромной палитры, которая существенно влияет на сложность и скорость информационных процессов преобразования изображений вполне вариабельна. Поэтому под аппроксимацией цифровых изображений в данной работе понимается исключительно тоновое их преобразование, целью которого является облегчение основной задачи технического зрения ТСАН – онлайн обнаружение и оценка препятствий. Эта задача предъявляет к системе ТЗ требование максимального быстродействия информационно-преобразующей системы ИПС обработки изображений. Это, в свою очередь, определяет основной целью ИПС ТЗ предельное понижение размерности палитры выходного изображения, обеспечивающей надежное распознавание препятствий. Если такая размерность уже определена, то остается задача оптимизации самого процесса (результата) аппроксимации

**Алгоритм аппроксимации цифровых изображений.** В работе вводится понятие монохромного мультитонового изображения (ММИ). Под ним следует понимать множество точек (пикселей  $p_k$ ) одного цвета, но разных  $k \in [1, N_s]$  тонов (яркостей). Это изображение есть упорядоченное множество

$$P = \{p_{ij} | i \in [1, r]; j \in [1, c]\}, \quad (1)$$

образующее прямоугольное изображение из  $r$  строк (row) и  $c$  столбцов (column) пикселей. Следовательно, множество  $P$  может быть представлено как матрица

$$P[i, j] = \begin{bmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1c} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{r1} & \cdots & p_{rc} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Как правило, в большинстве задач, требующих распознавание, используются ММИ. Стандартное ММИ для отображения использует 256 тонов условных яркостей серого (где 0 – абсолютно черный, а 255 – абсолютно белый), следовательно на каждый пиксель выделяется 8 бит.

Задачей аппроксимации является понижение размерности палитры, используемой для формирования рисунка (раскраски). Другими словами, применяется уменьшение количество тонов, выделенных для отображения изображения. Процедура заключается в замене значений пикселей исходного изображения на значения из аппроксимирующей палитры (АП). Рассматриваемая операция потенциально позволит упростить дальнейшую обработку изображений, выделение контуров препятствий и прочее для объектов ТСАН.

**Оценка качества аппроксимации цифровых изображений.** Очевидно, что любой критерий качества аппроксимации должен использовать информацию о несовпадении яркостей пикселей исходного и аппроксимирующего изображений с одинаковыми координатами  $i$  и  $j$  по строкам и столбцам их матриц:

$$P^E = P^A - P^I, \quad (3)$$

где  $P^E$  – результирующее отклонение,  $P^A$  – матрица аппроксимированного изображения;  $P^I$  – матрица оригинального изображения  $n \times m = N$  – количество пикселей аппроксимируемого изображения.

Различие в критериях оценки будет определяться формулой преобразования ошибок всех пикселей изображения.

Исследования по аппроксимации монохромных мультитоновых изображений были начаты в работах [6, 7]. В этих работах использовался распространенный критерий «наименьшего квадратического отклонения» (НКО) между пикселями оригинального и аппроксимированного изображения.

$$\Delta_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (p_{ij}^A - p_{ij}^I)^2, \quad (4)$$

где  $n \times m = N$  – количество пикселей аппроксимируемого изображения.

В работе [8] исследовался вопрос наиболее адекватной задаче аппроксимации оценки. В итоге критерий НКО был поставлен под сомнение и в качестве альтернативы было предложено использовать «наименьший модуль отклонения» (НМО):

$$\Delta_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m |p_{ij}^A - p_{ij}^I|. \quad (5)$$

Необходимо отметить, что глубокого анализа различия между двумя критериями оптимизации не проводилось, а решение было принято в связи с тем, что в ряде случаев критерий (4) оказывался неэффективным, или приводил к неадекватным задачам результатам преобразования изображения. Таким образом, возникла необходимость исследовать вопрос выбора наилучшей критериальной оценки аппроксимированного изображения.

**Оптимизация результатов аппроксимации цифровых изображений.** Первые работы по оптимизации аппроксимированных изображений в русле изложенной идеологии проводились как исследование задачи -аппроксимации в работах [10–16].

Как основной инструмент оптимизации там использовался роевой алгоритм. Однако серьезные проблемы, возникающие в связи с высокой размерностью пространства поиска, определяемой величиной  $P_a$ , не позволили в рамках сформулированной парадигмы оценить, ни возможность и вероятность обнаружения области абсолютного экстремума, ни наличие или отсутствие многоэкстремальности решения.

Поэтому, начиная с работ [6, 7] в качестве инструмента оптимизации аппроксимации исследовался эволюционно-генетический алгоритм менее чувствительный к размерности задачи. Выбор этого направления основывался на ряде поисковых исследований по методам аппроксимации изображений понижающей палитрой [10,12], и на опыте применения эволюционно-генетического алгоритма к континуальным и многоэкстремальным задачам [19–21]. Поисковые исследования по изучению различных аспектов представления описанной выше предметной задачи в хромосомно-генетической среде привели к разработке нескольких кардинально различающихся генно-хромосомных структур и приспособленных к ним алгоритмов их эволюционных преобразований. Эти структуры и алгоритмы подвергались модификациям, которые повышали, как поисковые возможности алгоритмов, так и их быстродействие [8, 9].

Итогом этих модификаций на сегодня является описанная и основанная на аппроксимирующей палитре с закрепленными исходным изображением краевыми тонами и свободно варьируемыми промежуточными тонами. Однако, как показали исследования, помимо генно-хромосомной структуры, на результаты аппроксимации и ее оптимизации существенно влияют критерий оптимизации и структура стартовой хромосомы. Под стартовой хромосомой понимается, в данном случае, начальный набор тонов для аппроксимации изображения, т.е. исходная опорная палитра (ОП), на основе которой генерируется начальная популяция применением алгоритма случайного варьирования этой исходной ОП. Исследования показали, что корректный подбор исходной ОП позволяет эффективно сузить область поиска оптимума и ускорить сам поиск.

Разработано две стратегии формирования исходной ОП: равномерное и «взвешенное» относительно диаграммы яркости исходного изображения распределения. Равномерная стратегия предполагает деление исходной палитры на равные диапазоны и выбор среднего тона для каждого участка. Взвешенная стратегия размер участка определяет исходя из количества тонов обрабатываемого диапазона яркостей. При таком подходе больший диапазон покрытия получают зоны с малым количеством тонов, так как их значимость в корректном отображении изображения меньше. Участки с большим удельным количеством тонов получают меньшие диапазоны для их начального варьирования. Необходимо отметить, что первый и последний тон в новой палитре всегда абсолютно черный и абсолютно белый.

**Постановка задачи.** Исследование направлено на изучение следующих трех проблем:

- ◆ исследование задачи определения оптимального размера палитры для аппроксимации применительно к предметной задаче;
- ◆ исследование влияния критерия оптимизации и стартовой аппроксимирующей палитры на точностную эффективность решения применительно к предметной задаче;
- ◆ исследование влияния критерия оптимизации и стартовой аппроксимирующей палитры на поисковую эффективность алгоритма;
- ◆ исследование перспективных возможностей эволюционно-генетического алгоритма по повышению быстродействия решения предметной задачи аппроксимации.

**Исследование задачи оптимизации размера аппроксимирующей палитры.** Несомненно, оптимальный размер палитры аппроксимированного изображения имеет множество зависимостей, как от внешней среды применения, так и от самой предметной задачи. На текущем этапе исследований можно сделать только обобщенный выбор размерности палитры, рассматривая ее с точки зрения максимальной универсальности. Для этого была проведена аппроксимация одного и того же изображения в диапазоне от 16 до 3 тонов. Выбор диапазона определялся двумя факторами:

- 1) визуальным анализом ряда фотографий различных производственных помещений в исходно и аппроксимированном форматах;
- 2) логическим анализом возможного минимума размерности палитры при аппроксимации ММИ.

На рис. 1 проиллюстрирована трансформация стандартного ММИ, выполненного в палитре 256 тонов в их аналоги, выполненные в палитрах 16, 8 и 5 тонов. Анализ всего диапазона результатов аппроксимации показал, что размерности 9–16 являются скорее избыточными. На рис. 1 видно, что размерность в 16 тонов по качеству почти не уступает оригиналу. Анализ изображений других производственных помещений привели к аналогичному результату.



*Рис. 1. Сравнение оригинального и аппроксимированных изображений*

В связи с этим выбор предпочтительного размера палитры для последующего исследования алгоритма аппроксимации целесообразно сделать из диапазона размерностей 8–3. Более подробный визуальный анализ показал, что размер палитры в 3 и 4 тона также следует исключить из рассмотрения, поскольку информативность находится на очень низком уровне. Размерность в 5–7 тонов уже удовлетворяют, в основном, требованиям минимально достаточного уровня для распознавания, но на разных изображениях разные, да и некоторые детали на них все же видятся довольно размазанными. Поэтому для исследований выбран размер палитры в 8 тонов.

Экспертная оценка этой палитры выявила согласное мнение, что уровень отображения в аппроксимированных на ее основе изображениях находится в пограничной зоне между качественной идентификацией деталей и потерей их четкости.

**Влияние структуры исходной палитры на ресурсно-качественные показатели аппроксимации.** Одной из основных сред использования автономно-передвижных объектов являются производства. В связи с этим для проведения эксперимента были выбраны фотографии с существенно разной яркостной диаграммой из области производственных помещений (ПП), примеры которых приведены на рис. 2. Размерность всех изображений составляет 400x300 пикселей. Намечен поисковый эксперимент по аппроксимации изображений выбранной группы из исходной 256-тоновой палитры в 8-тоновую.



Рис. 2. Изображения производственно-складских помещений

Для исследования выбран двухуровневый двухфакторный эксперимент. Он предполагает запуск алгоритма

- ♦ с двумя разными оценочными функциями – факторами на основе выражений (3) и (4) (критерии НКО и НМО),
- ♦ с двумя различными законами-факторами выбора стартовой структуры хромосомы, параметрически определяющей алгоритм аппроксимации (равномерного – Р и взвешенного – В разбиений аппроксимирующих тонов опорной палитры).

Каждый эволюционно-генетический поиск наилучшего варианта аппроксимации состоит из 30 итераций, где стартовой точкой каждой новой итерации является лучшая хромосома полученная на предыдущей итерации. Каждая опыт в плане эксперимента состоит из трех параллельных опытов, т.е. для каждой из четырех возможных пар выбранных варьируемых факторов («НКО-Р», «НКО-В», «НМО-Р» и «НМО-В») проводится по три поисковых опыта. Таким образом, эксперимент состоит из 48 опытов.

Все опыты проведены с одинаковыми настроечными параметрами эволюционно-генетического алгоритма. В связи с применением новой ГХС, являющейся доработанной ГХС, описанной и исследованной в работе [8], применены субоптимальные зна-

чения количественных факторов старого варианта, так как в новой модели этот показатель не изучен. Результаты эксперимента представлены в табл. 1, в которой используются следующие обозначения:  $\Delta_{k,m}^{st}$  – оценка оптимизации стартовой хромосомы (исходного распределения),  $k$  – для НКО,  $m$  – для НМО;  $\Delta_{k,m}^{ex}$  – средняя оценка оптимизации лучшей хромосомы среди 3 повторных запусков,  $N$  – средняя итерация, на которой была найдена лучшая хромосома. Лучшие значения критерия и затраченных итераций для каждого изображения выделены фоном.

Анализ результатов эксперимента показывает, что при квадратичной оценке однозначно выбрать какую-либо из стратегий распределения достаточно трудно. В трех случаях старт от равномерного распределения дал наилучшую среднюю оценку оптимизации, а старт от взвешенной – только в двух (см. табл. 1, строки 2, 5, 8 и 5, 11, соответственно). Однако, разница критериев появляется лишь в пятой значащей цифре. При этом в трех случаях при взвешенном распределении лучшая хромосома находилась за меньшее количество итераций, а для ПП-4 для нахождения требовалась всего одна итерация. Равномерное же распределение выиграло в быстродействии лишь в одном случае. Если же суммировать количество итераций, которые потребовались для нахождения наилучшего результата, то при старте с равномерного распределения затрачено 69 итераций, а со взвешенного – только 48.

Таблица 1

Результаты эксперимента

Фото	№ стр.	Оценка	НКО ( $\Delta_k$ )		НМО ( $\Delta_m$ )	
			Равномерный	Взвешенный	Равномерный	Взвешенный
ПП-1		$\Delta_{k,m}^{st}$	0,001362928	0,002378193	0,03180692	0,03028444
		$\Delta_{k,m}^{ex}$	0,001046911	0,001047181	0,02492656	0,02492656
		$N_1$	16	15	22	24
ПП-2		$\Delta_{k,m}^{st}$	0,001988857	0,002368522	0,036252189	0,037476274
		$\Delta_{k,m}^{ex}$	0,001611884	0,001611884	0,033919259	0,033918333
		$N_2$	22	14	14	1
ПП-3		$\Delta_{k,m}^{st}$	0,002949930	0,002465551	0,043659738	0,039869019
		$\Delta_{k,m}^{ex}$	0,001605733	0,001606227	0,034478006	0,034478006
		$N_3$	13	18	16	8
ПП-4		$\Delta_{k,m}^{st}$	0,002545926	0,003170636	0,04116320	0,037641111
		$\Delta_{k,m}^{ex}$	0,001281119	0,001280636	0,02952253	0,029520228
		$N_4$	18	1	17	9
			69	48	69	42

При модульной же оценке однозначное преимущество имеет взвешенная стратегия исходного распределения тонов опорной палитры. Во всех случаях была найдена наилучшая хромосома, тогда как при равномерном варианте – только в двух. При этом в трех случаях со взвешенного старта понадобилось меньшее количество итераций (в одном случае всего одна), а равномерный вариант опередил всего в одном случае. По общему количеству итераций взвешенный вариант выигрывает еще больше: 42 против 69.

Необходимо отметить, что полученные результаты получены только для 8-тоновой палитры. Однако можно предположить, что такой же результат будет наблюдаться также при других размерностях палитры.

**Влияние структуры критерия оптимизации на ресурсно-качественные показатели аппроксимации.** Дать на основании проведенного эксперимента оценку результативности двух исследуемых критериев: НКО и НМО с точки зрения точностной составляющей достаточно сложно. Оптимизируемые критерии имеют различную размерность, учитывая квадратичную структуру выражения (3). Но влияние этого фактора частично скомпенсировано тем, что в таблице рассматривается квадратный корень из оценки НКО – аналог СКО. Если рассматривать точностную эффективность критериев, то при использовании НКО для всех четырех изображений и для обеих стартовых стратегий получено более значительное понижение значения критерия по сравнению с исходным, нежели с использованием НМО при аналогичных условиях. Однако абсолютные значения минимизированных оценок НМО существенно меньше приведенных к ним по размерности НКО, и также для всех исследованных вариантов.

Поэтому к рассмотрению привлечена дополнительная характеристика алгоритма – быстроедействие. Она оценена условно – по количеству итераций, понадобившихся для решения задачи. Анализ этих оценок показывает, например, что алгоритм с НМО в качестве критерия оптимизации работает на ~40 % быстрее, что является весомым преимуществом. В условиях сложно уловимой разницы качества выходного изображения, этот фактор выбран определяющим.

Однако в пользу же НКО можно отнести тот факт, что средняя яркость выходного изображения оказывается ближе к исходной, нежели с НМО.

**Возможности повышения быстрогодействия алгоритма.** Ранее отмечалось, что по количественным параметрам (размер популяции и количество поколений) для новой ГХС субоптимизация не проводилась. Поэтому использовались предыдущие настроечные значения ЭГА, т.е. каждая итерация работает со 100 особями в популяции и исследует 80 поколений.

Поскольку количество поколений напрямую влияет на время работы ЭГА, 48 опытов проведенного эксперимента использованы для того, чтобы скорректировать этот показатель, ограничившись их необходимым количеством. Для этого исследованы этапы циклической схемы работы алгоритма, в котором в качестве исходного распределения каждой новой итерации выбирается наилучшая особь поколения предыдущей итерации.

Фрагменты архивного файла поколений, на которых были найдены наилучшие результаты в каждой из 30 итераций во всех 48 опытах, приведены на рис. 3, на котором столбцы сгруппированы по 3 параллельных опыта для каждого критерия, каждого распределения и 4 изображений последовательно.

В строках помещены данные о номере поколения (из 80) на котором произошло последнее для данной итерации улучшение используемого критерия оптимизации. Нулевое значение показывает, что за 80 поколений результата лучшего стартового распределения тонов ОП найдено не было. Хорошо видно, что среди данных преобладают именно нули.

Скорее всего, данный феномен связан с циклической схемой использования алгоритма. Полноценный поиск осуществляется только на первой итерации, тогда как остальные осуществляют своего рода доводку. В этом режиме большое значение имеет инициализация популяции, когда на этапе варьирования можно сместиться в худшую сторону. Такое заключение подтверждается тем, что после большего или меньшего количества «нулевых» итераций чаще всего алгоритм находит улучшенный результат. Характерно на это не требуется много поколений, в среднем не более 10.



	1	2	3	4	5	6	7	8		18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30		40	41	42	43	44	45	46	47	48
1	32	38	30	29	20	25	20	20		3	24	37	26	3	14	22	25	27	27	4	10	4		11	2	7	32	27	40	6	4	2
2	4	6	2	0	0	8	0	0		2	0	0	0	7	0	9	0	0	9	12	0	2		5	9	7	16	0	0	2	4	2
3	14	1	8	3	3	0	0	0		12	0	0	0	3	6	11	0	0	0	4	7	5		9	9	0	4	0	0	2	6	0
4	19	5	1	3	15	0	0	0		0	0	0	0	5	11	4	0	0	2	2	0	7		0	8	11	0	0	0	7	6	5
5	1	9	3	0	4	0	0	0		0	0	0	0	0	4	7	2	0	0	0	0	12		8	4	0	0	0	0	7	2	4
6	0	0	6	0	0	0	0	0		0	0	0	0	6	8	3	1	0	0	10	0	0		11	5	5	0	0	0	4	9	4
7	17	0	5	0	0	0	0	0		7	0	0	0	0	0	8	11	0	3	5	0	0		6	7	4	0	0	0	7	7	5
8	0	2	0	0	0	9	0	0		12	0	0	0	0	0	14	3	0	0	9	0	0		5	6	4	0	0	0	0	3	4
9	4	0	0	2	0	0	0	6		2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	9	0		0	2	0	0	0	0	10	5	8
13	0	12	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	18	0	0		0	0	0	0	0	0	0	14	0
14	0	1	0	0	0	0	0	5		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	25	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	1	0	9
16	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18		0	1	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	8		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	15		0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0		0	0	0	0	0	7	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	11	0	0		0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	1	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	18	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0		26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0

Рис. 3. Частичный архивный файл поколений каждого из опытов

Статистическая обработка иллюстрируемых на рис. 3 данных позволила оценить основные параметры итерационно-поколенческой структуры алгоритма эволюционно-генетической оптимизации понижающей палитры аппроксимации ММИ. В табл. 2 приведены результаты приближенного расчета (по максимальному в столбце) количества поколений, обеспечивающего заданную доверительную вероятность нахождения субоптима. Общее число исследуемых поколений при жесткой схеме построения итерационного алгоритма составляет  $80 \cdot 30 = 2400$  для каждого опыта. Рассчитав количество поколений для различных доверительных вероятностей, можно приближенно оценить выигрыш в быстродействии модифицированного ЭГА, приведенный в последнем столбце табл. 2.

Таблица 2

#### Структурно-параметрические характеристики ЭГА аппроксимации ММИ

Доверительная вероятность эффективной субоптимизации	Количество поколений ЭГА			Выигрыш в быстродействии:
	На первой итерации	До двадцатой итерации	До тридцатой итерации	
68 %	50	10	10	в ~7 раз
95 %	65	15	10	в ~5 раз
99,7 %	85	20	15	в ~4 раз

#### Заключение.

1) Наиболее перспективным для субоптимальной аппроксимации ММИ следует признать вариант алгоритма ЭГА с использованием генно-хромосомная структуры, основанной на аппроксимирующей палитре с краевыми тонами, закрепленными исходным изображением, и свободно варьируемыми промежуточными тонами.

2) Наиболее результативным критерием оптимизации аппроксимированного ММИ является НМО, рассчитываемый по выражению (4), т.к. его использование напрямую сокращает время работы алгоритма на ~40 %, т.к. исключается возведение в квадрат. Кроме того, при его использовании возникает возможность серьезного уменьшения количества итераций и реализация модифицированного многоступенчатого ЭГА.

3) Взвешенное распределение опорных тонов стартовой палитры дает существенный выигрыш и в количественном результате оптимизации и в быстродействии, обеспечивая в сочетании с критерием НМО возможность реализации модифицированного многоступенчатого ЭГА.

4) Таким образом, результаты исследований в этой работе показали целесообразность осуществления понижающей тоновой аппроксимации ММИ с использованием ЭГА, использующего генно-хромосомную структуру, основанную на аппроксимирующей палитре со свободно варьируемыми промежуточными тонами и крайними тонами, закрепленными исходным изображением. Критерием оптимизации целесообразно выбрать НМО, и использовать взвешенную относительно яркостной диаграммы стартовую палитру.

5) Необходимо отметить, что серьезный скачок по показателю быстродействия в результате субоптимизации количества поколений в итерациях не гарантирует онлайн обработку информации для СТЗ, которая необходима для ТСАН. Однако, модифицированный ЭГА может быть использован в фоновом режиме для построения текущего эталона палитры применительно к среде движения. Его прямое онлайн применение для преобразования графической информации позволит приблизить результат аппроксимации к субоптимальному.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Нейдорф Р.А., Полях В.В., Черногоров И.В., Ярахмедов О.Т.* Оптимизация маршрутов в среде с препятствиями эвристическими алгоритмами // Сборник материалов XI Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления». – 2016. – Т. 2. – С. 146-156. – URL: [http://psct.ru/files/ТОМ\\_II.pdf](http://psct.ru/files/ТОМ_II.pdf) (дата обращения: 21.11.2016).
2. *Нейдорф Р.А., Полях В.В., Черногоров И.В., Ярахмедов О.Т.* Эвристические алгоритмы в задачах прокладки маршрутов в среде с препятствиями // Материалы Всероссийской НТК с международным участием «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении» КомТех-2016. – 2016. – С. 53-59.
3. *Нейдорф Р.А., Полях В.В., Черногоров И.В., Ярахмедов О.Т.* Исследование эвристических алгоритмов в задачах прокладки и оптимизация маршрутов в среде с препятствиями // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 3 (176). – С. 127-143.
4. *Черногоров И.В.* Поиск кратчайшего пути в среде со статическими препятствиями методом поисковых частиц // Материалы Всероссийской НТК с международным участием «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении» КомТех-2016. – 2016. – С. 38-44.
5. *Туан З.Г.* Алгоритмы ускоренной обработки изображений препятствий в системе технического зрения робота // Инженерный вестник Дона. – 2015. – URL: [http://ivdon.ru/urloads/article/pdf/IVD\\_123\\_Nguyen\\_Tuan\\_Dung.pdf\\_ae9adb5979.pdf](http://ivdon.ru/urloads/article/pdf/IVD_123_Nguyen_Tuan_Dung.pdf_ae9adb5979.pdf).
6. *Агаджанян А.Г., Нейдорф Р.А.* Оптимизационно-поисковая аппроксимация монохромных мультитоновых изображений эволюционно-генетическим алгоритмом // Материалы Всероссийской НТК с международным участием «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении» КомТех-2016. – 2016. – С. 108-112.
7. *Агаджанян А.Г., Нейдорф Р.А.* Оптимизация аппроксимации монохромных мультитоновых изображений эволюционно-генетическим алгоритмом // Omega Science. – 2016. – № 108. – С. 11-17. – URL: <http://os-russia.com/SBORNIKI/KON-108-3.pdf>.
8. *Neydorf R.A., Aghajanyan A.G., Vucinic D.* Monochrome Multitone Image Approximation on Lowered Dimension Palette with Sub-optimization Method based on Genetic Algorithm // ACE-X 2016. – Split (Croatia). – 2016.
9. *Neydorf R.A., Aghajanyan A.G. and Vucinic D.* Monochrome multitone image approximation with low-dimensional palette // 2016 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Yerevan, 2016. Doi: 10.1109/EWDTS.2016.7807743.
10. *Neydorf R., Aghajanyan A., Vucinic D.* Monochrome Multitone Image Approximation with Low-dimensional Palette // Proceedings of the IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS' 2016) // EWDTS-2016. – Yerevan. – 2016, Copyright © 2016 by The Institute of Electrical and Electronics Engineers. – P. 319-322.

11. Деревянкина А.А. Структурно-параметрическая оптимизация полутоновых изображений методом S-аппроксимации в задачах распознавания образов // Вестник Донского гос. техн. ун-та. – 2009. – Т. 9. Спец. вып.: Технические науки, Ч. 2. <http://elibrary.ru/item.asp?id=14931765>.
12. Кудрина М.А. Климентьев К.Е. К 888 Компьютерная графика: учеб. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2013. – 138 с.
13. Деревянкина А.А., Нейдорф Р.А. Решение задач распознавания методом роящихся частиц с делением роя // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 7 (108). – С. 21-28.
14. Деревянкина А.А. Сравнительное исследование инженерно-эвристических подходов к s-аппроксимации полутоновых изображений // Труды I Международного семинара под общ. ред. Р.А. Нейдорфа. – Ростов-на-Дону: Изд. центр Донск. гос. техн. ун-та, 2010. – [http://ntb.donstu.ru/files/conference/articles\\_sacip\\_2010.pdf](http://ntb.donstu.ru/files/conference/articles_sacip_2010.pdf).
15. Деревянкина А.А. Автоматизация исследования изображений методом s-аппроксимации // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ – 23: Сб. тр. XXIII Междунар. науч. конф.: в 12 т. Т. 6. / под общ. ред. В.С. Балакирева. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2010.
16. Склярченко А.А., Деревянкина А.А., Нейдорф Р.А. Параметрическая оптимизация обобщенного алгоритма S-аппроксимации мультитоновых изображений // Труды III Международного семинара / под общ. ред. Р.А. Нейдорфа. – Ростов-на-Дону: Изд. центр Донск. гос. техн. ун-та, 2012. – [http://ntb.donstu.ru/files/conference/Articles\\_sacip\\_2012\(1\).pdf](http://ntb.donstu.ru/files/conference/Articles_sacip_2012(1).pdf).
17. Склярченко А.А., Деревянкина А.А., Нейдорф Р.А. Разработка универсального алгоритма S – аппроксимации полутонового изображения // Инновация, экология и ресурсосберегающие технологии на предприятиях машиностроения, авиастроения, транспорта и сельского хозяйства: Труды X Международного научно-технического форума, 2012.
18. Склярченко А.А. Выбор алгоритма S-аппроксимации для полутонового изображения // Инновация, экология и ресурсосберегающие технологии на предприятиях машиностроения, авиастроения, транспорта и сельского хозяйства: Труды X Международного научно-технического форума, 2012.
19. Агаджанян А.Г., Нейдорф Р.А. Параметрическая настройка эволюционно-генетического алгоритма на решение задач континуальной оптимизации // Проблемы управления, обработки и передачи информации (УОПИ-2015). – Саратов: Изд. дом «Райт-Экспо», 2015. – Т. 1. – С. 191-196.
20. Агаджанян А.Г. Экспериментальное исследование эффективности применения классического эволюционно-генетического алгоритма в континуальных задачах на примере исследования функции Растригина // Сборник статей ДГТУ. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2015.
21. Агаджанян А.Г., Нейдорф Р.А. Исследование эффективности эволюционного подхода при решении задач континуальной оптимизации // Omega Science. – 2015. – № 63. – С. 9-11.

## REFERENCES

1. Neydorf R.A., Polyakh V.V., Chernogorov I.V., Yarakhmedov O.T. Optimizatsiya marshrutov v srede s prepyatstviyami evristicheskimi algoritmami [Optimization of routes in an environment with obstacles heuristic algorithms], *Sbornik materialov XI Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya»* [the Collection of materials of XI all-Russian scientific-practical conference "advanced systems and control problems"], 2016, Vol. 2, pp. 146-156. Available at: [http://psct.ru/files/TOM\\_II.pdf](http://psct.ru/files/TOM_II.pdf) (Accessed 21 November 2016).
2. Neydorf R.A., Polyakh V.V., Chernogorov I.V., Yarakhmedov O.T. Evristicheskie algoritmy v zadachakh prokladki marshrutov v srede s prepyatstviyami [Heuristic algorithms for the task of routing in an environment with obstacles], *Materialy Vserossiyskoy NTK s mezhdunarodnym uchastiem «Komp'yuternye i informatsionnye tekhnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii» KomTekh-2016* [proceedings of all-Russian STC with international participation "Computer and information technologies in science, engineering and management" KomtekH-2016], 2016, pp. 53-59.
3. Neydorf R.A., Polyakh V.V., Chernogorov I.V., Yarakhmedov O.T. Issledovanie evristicheskikh algoritmov v zadachakh prokladki i optimizatsiya marshrutov v srede s prepyatstviyami [The study of heuristic algorithms in the tasks strip, and optimization of routes in an environment with obstacles], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 3 (176), pp. 127-143.

4. Chernogorov I.V. Poisk kratchayshego puti v srede so staticheskimi prepyatstviyami metodom poiskovykh chastits [Finding the shortest path in an environment with static obstacles by the method of search particles], *Materialy Vserossiyskoy NTK s mezhdunarodnym uchastiem «Komp'yuternye i informatsionnye tekhnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii» KomTekh-2016* [Materials of all-Russian STC with international participation "Computer and information technologies in science, engineering and management" Komtekh-2016], 2016, pp. 38-44.
5. Tuan Z.G. Algoritmy uskorennoy obrabotki izobrazheniy prepyatstviy v sisteme tekhnicheskogo zreniya robota [Algorithms for accelerated image processing the obstacles in the system of technical vision of robot], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of don], 2015. Available at: [http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_123\\_Nguyen\\_Tuan\\_Dung.pdf\\_ae9adb5979.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_123_Nguyen_Tuan_Dung.pdf_ae9adb5979.pdf).
6. Agadzhanyan A.G., Neydorf R.A. Optimizatsionno-poiskovaya approksimatsiya monokhromnykh mul'titonovykh izobrazheniy evolyutsionno-geneticheskim algoritmom [Optimization-search approximation monochrome-tion multitone images evolutionary genetic algorithm], *Materialy Vserossiyskoy NTK s mezhdunarodnym uchastiem «Komp'yuternye i informatsionnye tekhnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii» KomTekh-2016* [proceedings of all-Russian STC with international participation "Computer and information technologies in science, engineering and management" Komtekh-2016], 2016, pp. 108-112.
7. Agadzhanyan A.G., Neydorf R.A. Optimizatsiya approksimatsii monokhromnykh mul'titonovykh izobrazheniy evolyutsionno-geneticheskim algoritmom [Optimization approximation monochrome multitone images evolutionary genetic algorithm], *Omega Science*, 2016, No. 108, pp. 11-17. Available at: <http://os-russia.com/SBORNIKI/KON-108-3.pdf>.
8. Neydorf R.A., Aghajanyan A.G., Vucinic D. Monochrome Multitone Image Approximation on Lowered Dimension Palette with Sub-optimization Method based on Genetic Algorithm, *ACE-X 2016*. Split (Croatia), 2016.
9. Neydorf R.A., Aghajanyan A.G. and Vucinic D. Monochrome multitone image approximation with low-dimensional palette, *2016 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Yerevan, 2016*. Doi: 10.1109/EWDTS.2016.7807743.
10. Neydorf R., Aghajanyan A., Vucinic D. Monochrome Multitone Image Approximation with Low-dimensional Palette, *Proceedings of the IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS' 2016), EWDTS-2016*. Yerevan, 2016, Copyright © 2016 by The Institute of Electrical and Electronics Engineers, pp. 319-322.
11. Derevyankina A.A. Strukturno-parametricheskaya optimizatsiya polutonovykh izobrazheniy metodom S-approksimatsii v zadachakh raspoznavaniya obrazov [Structural-parametric optimization of half-tone images by the method of S-approximation in pattern recognition problems], *Vestnik Donskogo gos. tekhn. un-ta* [Vestnik of don state technical University], 2009, Vol. 9. Spets. vyp.: *Tekhnicheskie nauki* [Special issue: engineering science], Part 2. Available at: <http://elibrary.ru/item.asp?id=14931765>.
12. Kudrina M.A. Kliment'ev K.E. K 888 Komp'yuternaya grafika: ucheb. [K 888 to Computer graphics: proc.]. Samara: Izd-vo Samar. gos. aerokosm. un-ta, 2013, 138 p.
13. Derevyankina A.A., Neydorf R.A. Reshenie zadach raspoznavaniya metodom royashchikhsya chastits s deleniem roya [The decision of tasks of recognition by the method of swarming particles with division of the plenty], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 7 (108), pp. 21-28.
14. Derevyankina A.A. Sravnitel'noe issledovanie inzhenerno-evristicheskikh podkhodov k s-approksimatsii polutonovykh izobrazheniy [A comparative study of engineering and heuristic approaches to s-approximations of grayscale images], *Trudy I Mezhdunarodnogo seminara pod obshch. red. R.A. Neydorfa* [Proceedings I International seminar under the General editorship of R. A. Neudorf]. Rostov-on-Don: Izd. tsentr Donsk. gos. tekhn. un-ta, 2010. Available at: [http://ntb.donstu.ru/files/conference/articles\\_sacip\\_2010.pdf](http://ntb.donstu.ru/files/conference/articles_sacip_2010.pdf).
15. Derevyankina A.A. Avtomatizatsiya issledovaniya izobrazheniy metodom s-approksimatsii [Automation of imaging studies by the method of s-approximation], *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh – MMTT – 23: Sb. tr. KhKhIII Mezhdunar. nauch. konf.* [Proceedings of the XXIII International scientific conference]: in 12 vol. Vol. 6. ed. by V.S. Balakireva. Saratov: Sarat. gos. tekhn. un-t, 2010.

16. *Sklyarenko A.A., Derevyankina A.A., Neydorf R.A.* Parametricheskaya optimizatsiya obobshchennogo algoritma S-approximatsii mul'titonovykh izobrazheniy [Parametric optimization of the generalized algorithm S-approximation multitoneal images], *Trudy III Mezhdunarodnogo seminar* [Proceedings of III international seminar], ed. by R.A. Neydorfa. Rostov-on-Don: Izd. tsentr Donsk. gos. tekhn. un-ta, 2012. Available at: [http://ntb.donstu.ru/files/conference/Articles\\_sacip\\_2012\(1\).pdf](http://ntb.donstu.ru/files/conference/Articles_sacip_2012(1).pdf).
17. *Sklyarenko A.A., Derevyankina A.A., Neydorf R.A.* Razrabotka universal'nogo algoritma S – approximatsii polutonovogo izobrazheniya [Development of a universal algorithm S – approximations of grayscale images], *Innovatsiya, ekologiya i resursosberegayushchie tekhnologii na predpriyatiyakh mashinostroeniya, aviastroeniya, transporta i sel'skogo khozyaystva: Trudy X Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo foruma, 2012* [Innovation, ecology and resource-saving technologies at enterprises of machine building, aircraft industry, transport and agriculture: proceedings of the X International scientific and technical forum, 2012].
18. *Sklyarenko A.A.* Vybor algoritma S-approximatsii dlya polutonovogo izobrazheniya [The choice of algorithm S-approximation for halftone image], *Innovatsiya, ekologiya i resursosberegayushchie tekhnologii na predpriyatiyakh mashinostroeniya, aviastroeniya, transporta i sel'skogo khozyaystva: Trudy X Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo foruma, 2012* [Innovation, ecology and resource-saving technologies at enterprises of machine building, aircraft industry, transport and agriculture: proceedings of the X International scientific and technical forum, 2012].
19. *Agadzhanyan A.G., Neydorf R.A.* Parametricheskaya nastroyka evolyutsionno-geneticheskogo algoritma na reshenie zadach kontinual'noy optimizatsii [Setting of parameters of evolutionary-genetic algorithm for task solving continuous optimization], *Problemy upravleniya, obrabotki i peredachi informatsii (UOPI-2015)* [Problems of management, processing and transmission of information (WOPI-2015)]. Saratov: Izd. dom «Rayt-Ekspo», 2015, Vol. 1, pp. 191-196.
20. *Agadzhanyan A.G.* Eksperimental'noe issledovanie effektivnosti primeneniya klassicheskogo evolyutsionno-geneticheskogo algoritma v kontinual'nykh zadachakh na primere issledovaniya funktsii Rastrigina [Experimental study of efficiency of application of classical evolutionary genetic algorithm in continuous tasks on the example of Rastrigin function], *Sbornik statey DGTU* [Collection of articles DSTU]. Rostov-on-Don: DGTU, 2015.
21. *Agadzhanyan A.G., Neydorf R.A.* Issledovanie effektivnosti evolyutsionnogo podkhoda pri reshenii zadach kontinual'noy optimizatsii [Study of the effectiveness of the evolutionary approach in solving problems continuous optimization], *Omega Science*, 2015, No. 63, pp. 9-11.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.И. Финаев.

**Нейдорф Рудольф Анатольевич** – ДГТУ; e-mail: ran\_pro@mail.ru; Ростов-на-Дону, ул. Беляева, 22А, кв. 57; тел.: 88632738727; профессор.

**Агаджанян Альберт Грантович** – e-mail: foralbert92@gmail.com; Ростов-на-Дону, ул. Доватора, 117/92А; тел.: +79515050716; аспирант.

**Neydorf Rudolf Anatolyevich** – DSTU; e-mail: ran\_pro@mail.ru; 22A, Belyaeva street, apt. 57, Rostov-on-Don, Russia; phone: +78632738727; professor.

**Aghajanyan Albert Grantovich** – e-mail: foralbert92@gmail.com; 117/92A, Dovatora street, Rostov-on-Don, Russia; phone: +79515050716; postgraduate student.